ESSAI DE BILAN DE LA PRODUCTION D'AZOTE MINÉRAL D'UN SOL EN PLACE

PAR

G. LEFÈVRE et G. HIROUX
Station d'Agronomie, Amiens.

PLAN DU MÉMOIRE

Introduction.
Considérations générales.
Résultats.
Résumé et conclusions.
Références bibliographiques.

INTRODUCTION

Si l'on peut estimer, en première approximation, qu'un entretien raisonné des réserves phospho-potassiques, amenées à un niveau convenable de richesse, est capable, par l'intermédiaire des mécanismes régulateurs du sol, d'assurer une alimentation capable de répondre à chaque instant aux besoins du développement végétal, on ne peut par contre rien affirmer en ce qui concerne la nutrition azotée. Avant l'emploi des engrais minéraux, la production végétale suivait obligatoirement le rythme de libération d'azote fournie par l'activité microbienne, et les mouvements de l'eau dans le sol. Les possibilités offertes par les engrais azotés ont permis, entre autres choses, de sélectionner des variétés dont les exigences qualitatives et quantitatives seraient maintenant difficilement satisfaites par les transformations naturelles du sol. Par ailleurs, on a pu développer des cultures et des moyens d'exploitation ayant pour conséquence soit une augmentation relative de la production de fumier (culture intensive d'herbes, résidus végétaux plus importants), soit des substitutions à cette forme d'entretien organique (engrais verts, enfouissement de paille, ley-farming...). L'entretien azoté d'un sol constitue donc un sujet

qui s'est transformé mais qui ne peut encore être séparé de l'évolution des réserves organiques.

A cette opinion s'oppose parfois le raisonnement suivant qui séduit par la rigueur de sa conclusion. « On recommande aux agriculteurs de maintenir leur sol en équilibre humique, c'est-à-dire de prendre les mesures nécessaires pour que l'humus du sol se retrouve dans le même état à chaque retour d'une même phase de la rotation. Dans ces conditions le sol ne peut fournir de l'azote que dans la mesure où il en reçoit de l'agriculteur et des organismes fixateurs d'azote .» Ce raisonnement peut être traduit de la façon suivante : « Supposons le problème de l'entretien organique résolu. Il suffit alors d'apporter au sol l'azote qu'il perd .» A cela on peut objecter que le problème est précisément d'utiliser au mieux l'azote minéral en vue de favoriser le rendement d'une culture donnée tout en permettant d'entretenir économiquement les réserves organiques du sol. Dans l'établissement d'un plan d'exploitation, la succession des cultures et la fumure doivent être choisies pour diminuer au maximum les pertes par drainage qui peuvent être importantes, par exemple, en fin d'été en sol nu. L'entretien des réserves humiques peut ainsi représenter, suivant les cas, une économie d'azote minéral ou au contraire une consommation excessive d'engrais destiné uniquement à faire de la matière organique.

L'étude de la minéralisation de l'azote organique en place reste seule capable de fournir les éléments indispensables à la rationalisation des fumures azotées minérales. Elle est cependant insuffisante en elle-même pour répondre entièrement aux objectifs que nous avons donnés précédemment aux fumures minérales. Elle s'intègre dans un ensemble que nous pourrions schématiser de la façon suivante :

1° Recherche des besoins absolus de la plante.

Cela représente l'étude quantitative et spatiale de l'absorption de l'azote par les espèces et variétés végétales. Cette recherche a été poursuivie empiriquement au champ depuis le début des travaux agronomiques. En se plaçant dans les conditions climatiques moyennes des diverses regions naturelles, elle pourrait trouver des réponses plus précises grâce aux cases de végétation (COLLIER). Le point de vue quantitatif peut être résolu en solutions coulantes (concentrations idéales aux divers moments physiologiques).

2° Mesure de la production d'azote minéral dans des sols, soumis aux mêmes conditions climatiques et représentant des types bien définis, tant par leur nature pédologique que par leur entretien organique. Ce travail permet non seulement de connaître la production quantitative d'un sol donné mais également de suivre les mouvements de l'azote minéral, fourni ou apporté, et d'en mesurer les pertes.

3° Recherche de la fumure minérale pouvant compléter la produc-

tion naturelle afin de faire face aux besoins mesurés dans la première partie. Les mouvements étudiés dans la deuxième partie peuvent servir à définir le moment idéal de fumure.

Ce programme ne manquera pas de paraître chimérique tant dans sa conception que dans sa réalisation. Il représente en fait la synthèse des buts d'une expérimentation chaque année plus nombreuse, mais à objectifs restreints. Tous les essais de fumure azotée minérale sont difficiles à interpréter du fait de la mobilité des éléments apportés et de la méconnaissance des réactions propres du sol. Combien de champs et combien d'années ont été consacrés à l'étude de l'action comparée de fumures azotées d'hiver ou de printemps pour céréales? Plus récemment les nombreux essais portant sur la répartition dans le temps des fumures à fournir aux différentes cultures ou sur leur localisation dans le sol auraient une signification beaucoup plus grande s'ils étaient complétés par les mesures définies précédemment.

Toute cette expérimentation donne actuellement des résultats variables, parce qu'entièrement sous la dépendance des conditions climatiques. Il s'agit, en fait, d'observations de grande valeur, utilisables dans la mesure où on peut les rattacher à un type d'exploitation donné et à un cycle climatique déterminé. Les résultats ne valent que pour les variétés utilisées dans les essais.

Les essais ne résolvent pas le problème de l'entretien organique, qui peut être grossièrement ramené à celui de l'azote organique. On revient ainsi à renverser le sophisme énoncé en commençant : « Si l'on fournit au sol l'azote (minéral et organique) qu'il perd (exportation, drainages, dénitrification) l'équilibre humique sera assuré.» Connaissant les parts respectives fournies par le sol et par les engrais, l'équilibre humique revient à fournir au sol les quantités de matières organiques susceptibles de fournir aux moments homologues d'une rotation et dans les mêmes conditions des quantités identiques d'azote minéral.

On redoute d'aborder ce problème par l'étude de la minéralisation en place et par celle des mouvements de l'azote minéral parce que cela, représente une tâche considérable, dont il est en fait plus facile que pour une expérimentation à objectif mal défini, de dénoncer les limites.

Les observations recueillies jusqu'à ce jour ont été faites en sol nu. Les résultats ainsi obtenus ne donnent donc actuellement qu'une approximation, de grande valeur, mais une approximation que des travaux ultérieurs ou déjà commencés permettront d'utiliser entièrement. Ces travaux connexes sont en eux-mêmes très importants et font l'objet d'études séparées. Nous en résumerons quelques-uns :

1. — Influence de la végétation sur les mouvements de l'eau du sol.

2. — Influence de la culture sur la minéralisation, question groupant tout ce qui touche à la Rhizosphère.

3. — Influence des engrais minéraux sur la minéralisation.

En replaçant ainsi l'étude de la minéralisation de l'azote organique dans son cadre, il apparaît qu'un grand nombre des recherches nécessaires à son utilisation totale ont déjà fait l'objet de travaux dont on pourrait rapprocher les résultats. Nous écartant de ces perspectives nous voudrions seulement dans ce mémoire étudier les données fournies par la mesure des variations de la teneur en azote minéral du sol en place et voir comment les essais de minéralisation à l'étuve en permettent l'interprétation.

PREMIÈRE PARTIE

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES

L'azote minéral, allant de la forme ammoniacale à la forme nitrique, est considéré comme constituant l'état sous lequel l'azote peut être assimilé par les végétaux. Il correspondrait en quelque sorte au vocable de soluble appliqué aux autres éléments minéraux. Si l'on tentait de poursuivre la comparaison, avec la potasse par exemple, l'azote minéralisable devrait correspondre aux formes échangeables fixées sur l'argile. Mais cette mise en parallèle, très factice d'ailleurs, ne peut être continuée, car la réserve azotée organique assure le renouvellement de l'azote minéralisable d'une façon qui ne rappelle en rien le mécanisme reliant les formes difficilement échangeables ou les minéraux potassiques à la potasse échangeable. Les agents d'évolution sont différents et le cycle azoté, pour sa part, est presqu'entièrement régi par des phénomènes biologiques. C'est d'ailleurs une difficulté supplémentaire qui peut masquer complètement l'intérêt de la mesure au champ de l'azote minéral. Aussi est-il nécessaire de poser les données de cette étude en analysant les éléments qui la composent.

Dans la minéralisation de l'azote, on peut envisager successivement les points suivants :

1° le matériel à décomposer,

2° l'agent de la décomposition,

3° le milieu :

physique,

chimique,

climatique, dans lequel s'opère cette décomposition.

1. — Le matériel à décomposer est très complexe. On peut admettre, suivant les données de la chimie biologique, que les formes susceptibles de fournir en fin de chaîne de l'azote minéral doivent être les formes organiques azotées les plus simples, c'est-à-dire les acides aminés. D'après la définition précédente ceux-ci devraient même constituer l'azote minéra-

lisable, avec cette différence toutefois qu'ils peuvent représenter une masse beaucoup plus importante que la quantité d'azote minéral qui est effectivement libérée en un mois d'étuve. Des recherches ont déjà permis d'isoler du sol un certain nombre d'acides aminés, mais ces recherches se sont surtout attachées à voir la signification de leur répartition qualitative. De plus ces acides aminés ne représentent qu'une forme transitoire en équilibre avec l'azote ammoniacal et la masse des protéines plus ou moins complexes. En définitive le matériel à décomposer reste constitué par l'ensemble des réserves organiques azotées dont une évaluation globale est fournie par la mesure de l'azote total.

En poursuivant l'analyse de cette matière azotée en équilibre avec des produits hydrocarbonés, il est vraisemblable qu'on progresserait dans l'étude du dynamisme de l'entretien organique, mais cette voie n'a fourni jusqu'à présent que peu de renseignements.

Les travaux sur la matière organique du sol ne font que confirmer que cette dernière est en perpétuelle évolution et que, pour le sujet qui nous occupe, on est, pratiquement, obligé de la considérer dans son sens le plus vague. Cette constatation est grave, car elle montre que nous n'avons pas beaucoup de moyens pour savoir si l'on peut, en fait, comparer entre elles les matières organiques de sols différents. Sur le plan général on se rattache aux notions suivantes : mesure de carbone total, mesure d'azote total, ou même à des données plus vagues telles que sols ayant un même passé cultural. Devant cette imprécision, on a tendance à inverser le problème et à évaluer l'état de la matière organique par la façon dont elle se décompose, en mesurant un produit de sa dégradation, soit l'azote minéral, soit le gaz carbonique. Il faut donc reconnaître qu'on a relativement peu de données précises sur le matériel de départ. Cette constatation conduit cependant à souligner que, dans des conditions déterminées, la mesure d'azote minéral peut représenter au champ, comme au laboratoire, un moyen permettant d'évaluer l'état d'une matière organique.

2. — Le rôle d'agent de décomposition est attribué généralement à la vie microbienne du sol. La nitrification a fait l'objet de travaux dont la rigueur démonstrative peut être citée en exemple (Winogradsky). La phase préliminaire, l'ammonification, s'appliquant à des produits beaucoup plus variés, peut être réalisée par une plus grande variété de micro-organismes. De nombreux mécanismes d'action ont été présentés, tant en aérobiose qu'en anaérobiose. Cette dégradation étant beaucoup plus multiforme, les conditions idéales de son action ne peuvent être décrites d'une manière aussi précise que pour la nitrification. Aussi il peut être utile de faire remarquer que les conditions actuellement utilisées pour faire les essais de minéralisation à l'étude représentent des conditions favorables à la nitrification (prise dans son sens restreint) et qu'elles ne coïncident pas forcément avec celles qui favorisent une bonne ammoni-

fication. On peut seulement dire que l'ammoniaque représente un déchet du métabolisme des ammonificateurs et qu'en favorisant sa transformation dans le milieu on permet à ces agents microbiens de poursuivre leur action.

D'autres mécanismes de minéralisation ont été avancés par certains auteurs (DHAR, ROSSI). Ils auraient pour cause une réaction photochimique que WAKSMAN n'a pu reproduire au laboratoire. Cependant certaines des observations relevées par l'un d'entre nous avec DROUINEAU et Mme BLANC-AICARD, en milieu sec et à des températures de 40 à 50°, ne semblent pas devoir résulter d'actions microbiennes, à moins d'envisager la décomposition des protéines de leurs cellules.

De plus lorsque les observations sont faites sur le terrain, il ne faut pas oublier que certaines concentrations d'azote minéral peuvent ne pas être produites in situ mais résulter de mouvements ascendants ou descendants de l'eau du sol. Cette action complique l'établissement du bilan azoté d'une couche déterminée de sol.

3. — Les travaux de microbiologie pure ont permis de connaître certains mécanismes d'action des micro-organismes. Ils se déroulent dans des conditions déterminées de milieu qui, dans certains cas, peuvent en modifier la signification. Mais ils ont l'avantage de mesurer précisément l'influence des facteurs physiques ou chimiques sur certaines phases de l'action microbienne. En suivant l'évolution d'un des produits finaux du métabolisme, azote ou gaz carbonique, on ne peut évaluer que l'action globale des facteurs du milieu qui se montrent, ainsi, favorables ou défavorables à la manifestation finale du phénomène. Il est donc du plus haut intérêt de compléter les observations globales par les données fournies par la microbiologie, afin de confronter les résultats obtenus par les deux méthodes. Nous en signalerons un exemple dans l'accumulation des nitrites en sol calcaire, accumulation qui a pu être attribuée à un pH dont la valeur ne pouvait être suffisamment abaissée par l'acidification de la première phase ammoniaque-nitrite, pour permettre l'action de la deuxième phase nitrite-nitrate. Ce cas, relativement simple, se complique lorsqu'on remonte la chaîne, puisque par combinaison d'actions de ce genre le matériel se trouve, dès le départ, modifié par les conditions de milieu.

Dans cet ensemble, la mesure de l'azote minéral et l'étude de la minéralisation à l'étuve représentent des estimations grossières que nous ne considèrerons que comme un outil de travail. C'est cependant un outil de grande valeur car il reste en quelque sorte le seul utilisable pour attaquer en bloc l'évolution de la matière organique en place. Gardant à l'esprit ce caractère, nous ne pourrons oublier que les mesures qu'il fournit peuvent et doivent être confrontées avec les résultats d'autres travaux de recherches.

4. — Il semble au premier abord que le bilan général de la minéralisation de l'azote en place ne puisse vraiment être réalisé qu'en cases lysimétriques. Ces cases en effet permettent seules d'évaluer réellement un des éléments du bilan ; les pertes par drainage. Mais, par ailleurs, s'il arrivait que les chutes de pluie soient distribuées de façon telle qu'il n'y ait pas de percolation, on serait amené à en conclure qu'il ne s'est pas formé d'azote minéral. Les observations lysimétriques doivent donc être complétées par des dosages d'échantillons de sol prélevés dans les cases. Ceci n'est guère réalisable dans les dispositifs actuellement employés car les prises d'échantillons sur toute la profondeur du profil modifieraient sensiblement le drainage et conduiraient plus ou moins rapidement à l'épuisement du matériel. Cette difficulté pourrait peut être, être tournée en utilisant un grand nombre des appareils décrits par W. H. MAC INTIRE... Cela fournirait un dispositif dont les divers éléments pourraient être utilisés au fur et à mesure des besoins. Cette installation permettrait également d'envisager plus facilement des comparaisons entre des cases nues et des cases cultivées.

L'équipement de nos stations en cases lysimétriques ne permet donc pas actuellement une étude aussi complète. Ramené au champ, l'examen des richesses en azote minéral est obligatoirement cantonné à des parcelles conservées nues. L'intensité relativement faible de l'exploitation radiculaire et sa localisation variable dans le temps rendent en effet impossible un échantillonnage convenable de prélèvements de sols cultivés. Même si on pouvait le concevoir, les mesures seraient encore probablement faussées, au cours de l'extraction, par des produits de l'hydrolyse d'éléments de la rhizosphère (ceci pourrait d'ailleurs être l'objet d'un travail spécial). Limitées actuellement aux sols nus, les mesures d'azote minéral en place varient avec la date du prélèvement ou plus exactement avec les données climatiques qui l'ont précédé. Ce caractère très important n'enlève cependant pas toute valeur à un ensemble de mesures effectuées à un moment donné, lorsqu'on compare par exemple l'effet de divers traitements organiques sur des parcelles soumises aux mêmes facteurs climatiques. Cela situe d'ailleurs les deux objectifs principaux de ces mesures :

1° Repérer par un sondage l'effet de traitements azotés organiques ou minéraux. L'époque du prélèvement peut alors être presque quelconque, mais elle se rattachera le plus souvent à certains états physiologiques des cultures qui reçoivent habituellement ces traitements. L'effet mesuré est alors partiel, car rien ne permet de savoir si la date du prélèvement correspond à une manifestation importante du phénomène que l'on cherche à mesurer..

2° Suivre sur une parcelle, traitée ou non, l'évolution de la richesse minérale azotée du sol.

La limite des observations répondant au premier objectif conduit

en fait à ne pas les séparer des études du deuxième type. C'est en cela d'ailleurs que ces recherches paraissent assez lourdes pour un laboratoire. Dans la pratique elles peuvent cependant se simplifier à la longue, en tenant compte des faits suivants :

a) Les mesures réalisées depuis près de dix ans, dans des conditions climatiques différentes, permettent de conclure que l'influence des traitements se fait sentir sur l'amplitude des variations (mensuelles par exemple) mais n'en modifie pas le sens. Le cas le plus typique peut en être donné par l'effet des enfouissements de paille. Ce fait fondamental permet précisément de mesurer l'effet de traitements organiques.

b) Dans ces conditions, si l'on ne recherche que le sens d'évolution de la libération de l'azote minéral, ou encore les époques, pour des conditions climatiques données, de son accumulation, on peut en quelque sorte faire abstraction de son passé organique. Par contre, certaines conditions du milieu étant en jeu, il y a intérêt à suivre cette évolution dans des types de sols par ailleurs bien déterminés. Cette comparaison rentrera dans un programme complet d'investigation.

c) La poursuite, pendant plusieurs années, de l'étude des variations des teneurs du sol en azote minéral doit permettre, dans le cadre soit de *a* soit de *b*, d'analyser les résultats en fonction des variations des données climatiques. Cela dans le but de définir des corrélations permettant en quelque sorte de déduire les réactions du sol en fonction de données climatiques facilement repérables (pluie, température...).

Ces études se trouvent ainsi liées aux types climatiques qui ont à ce point de vue des caractéristiques plus ou moins nettes. Lorsque ces types sont bien définis on peut obtenir, dans les cas les plus favorables, une corrélation significative entre des mesures de laboratoire et l'accumulation effective de l'azote minéral en cours d'année (cas par exemple de la relation entre l'azote minéralisable, pris au mois de mars, départ du cycle biologique, et la teneur maximum d'azote minéral relevé au cours de l'année, sous climat méditerranéen). Pour que ce pronostic se vérifie il faut évidemment que le type climatique ne se différencie pas, au cours d'années anormales, des conditions notées pendant les années qui ont servi aux observations.

Dans le cas de climat non défini, il devient nécessaire de poursuivre les observations pendant un nombre d'années encore plus élevé, afin de pouvoir étudier dans le détail l'influence de certains facteurs jouant sur une période déterminée (par exemple influence d'un ensemble température, répartition des pluies, au cours de mois successifs). Cette étude plus difficile devient également plus générale et devrait permettre plus aisément d'extrapoler les résultats.

Cependant, il reste encore une difficulté dans ce problème de la production d'azote minéral. La mesure en place de la teneur en azote miné-

ral représente, au moment de la prise de l'échantillon, la résultante entre la formation et les pertes de cet élément. Elle ne mesure que dans certains cas la production réelle du sol. Or cet aspect de la production est un des plus importants, tant pour connaître la quantité totale mise à la disposition des plantes que pour évaluer l'usure réelle des réserves du sol. Ce sujet ne pourrait être complètement traité, comme nous le disions plus haut, que par les cases lysimétriques à condition, avons-nous vu, de les sacrifier au cours des mesures. Mais ce caractère, faisant d'une teneur un bilan entre la formation et les pertes, s'applique également à l'azote minéralisable.

La conjonction ou la confrontation de ces deux variations, plus ou moins indépendantes, permettent de déduire par observation ou par raisonnement, des informations sur l'évolution de l'azote total. Pour cela il est nécessaire de revenir sur la définition de l'azote minéralisable.

On appelle azote minéralisable la quantité d'azote minéral représentant la différence entre la teneur d'un échantillon de sol en place et celle du même échantillon après un certain temps d'évolution dans des conditions définies de température et d'humidité. Dans nos essais c'est la quantité minéralisée, en un mois d'étuve à 27°, d'un échantillon de sol dilué de moitié avec du sable siliceux et amené à 60 p. 100 de sa capacité de rétention au champ.

Ces conditions d'essais sont conventionnelles, comme nous l'avons déjà vu, car il est pratiquement impossible de trouver un milieu favorisant toutes les phases de la minéralisation. Il est évident que si la minéralisation dans son ensemble était à l'optimum sans intervention possible d'autres associations de conditions de milieu on aboutirait, pour les sols en place, comme on l'observe précisément à l'étuve, à des variantes de courbes de minéralisation prolongées sur plusieurs mois et à un épuisement rapide de la faculté de produire de l'azote minéral.

Le passage à l'étuve constitue donc un « test » permettant d'évaluer à un moment donné les aptitudes du sol à fournir dans des conditions définies de l'azote minéral.

C'est parce que les conditions externes de ce test sont toujours les mêmes qu'il constitue effectivement un reflet des modifications que la matière organique peut subir dans le sol en place. Les variations d'azote minéralisable permettent ainsi d'appuyer ou de corriger les déductions que l'on pourrait tirer des seules variations de la teneur en azote minéral. Il est aussi valable de raisonner sur des variations d'azote minéralisable que de faire un bilan sur une variation de potasse assimilable par exemple. Bien que ces mesures ne reconstituent intégralement pas les mécanismes exacts de libération des éléments en place, on peut les considérer comme un moyen de repère qui, utilisé dans des conditions uniformes, permet de déduire d'une variation de sa valeur, une évolution de l'élément dosé.

Supposons en effet que sur une série de parcelles ne représentant qu'un traitement, on prélève tous les mois un échantillon.

Pour le prélèvement du mois 1, la teneur du sol en azote minéral est, par exemple, m_1 (exprimé généralement en mg pour 100 g). Après un passage d'un mois à l'étuve dans les conditions fixées précédemment, la richesse du sol devient T_1 ; l'azote minéralisable par définition est $T_1 - m_1 = M_1$.

Pour le prélèvement du mois suivant, 2, la teneur en azote minéral est m_2 ; après le passage à l'étuve on obtient une valeur T_2 ; l'azote minéralisable au mois 2 est $T_2 - m_2 = M_2$.

Si les conditions à l'étuve étaient optima pour la minéralisation on devrait toujours avoir :

$$m_2 \leqslant T_1 \qquad \text{et} \qquad M_2 < M_1$$

et si les phénomènes de régénération de l'azote minéralisable — que nous appellerons de préminéralisation — n'intervenaient pas au champ, on devrait avoir également :

$$m_2 - m_1 = M_1 - M_2 \qquad \text{(c'est-à-dire } T_2 = T_1\text{)}$$

L'expérience montre qu'il n'en est pas ainsi et qu'il existe, au champ, toutes les possibilités de variations de ces trois données (azote minéral avant étuve, azote minéral après étuve, azote minéralisable). Les variations d'un mois à l'autre de la teneur en azote minéral peuvent être interprétées de la façon suivante :

si $m_2 > m_1$ il y a : soit minéralisation au champ,
soit remontée ou descente dans l'horizon prélevé, d'azote minéral formé ailleurs ;

si $m_2 = m_1$ il n'y a pas de minéralisation,
ou bien il y a :
production d'azote minéral et sortie d'une quantité équivalente ;

si $m_2 < m_1$ il y a : sortie, par lessivage ou remontée, d'azote minéral de l'horizon dans lequel on a prélevé,
ou bien :
une partie de l'azote minéral a été transformé en azote organique (réorganisation).

Les variations absolues de ces valeurs ne peuvent être considérées, dans leur interprétation, que comme des variations minima.

La mesure de l'azote minéralisable permet de compléter cette interprétation. En effet :

si $M_2 < M_1$ de l'azote minéralisable de l'échantillon a été perdu soit par minéralisation (sans préminéralisation correspondante) soit par lessivage (en pratique, pour les réserves du sol, cela revient au même qu'une minéralisation et un lessivage de l'azote minéral formé) ;

si $M_2 = M_1$ il ne se passe rien,

TABLEAU I. — *Tableau clef d'interprétation des variations mensuelles d'azote minéral avant étuve Δm, d'azote minéral après passage à l'étuve ΔT, et d'azote minéralisable $\Delta M = \Delta T - \Delta m$.*

$\Delta M < 0$ ΔM = quantité minimum d'azote minéralisé	$\Delta T < 0$ lessivage ΔT = quantité minimum lessivée	$\Delta m < 0$	ΔM = quantité minimum d'azote minéralisé. ΔT = quantité minimum d'azote minéral sorti de l'horizon où a été pris l'échantillon.
		$\Delta m = 0$	$\|\Delta M\| = \|\Delta T\|$ la quantité d'azote minéral lessivé reste équivalente à la quantité ΔM d'azote minéral formé pendant la même période.
		$\Delta m > 0$	$\|\Delta m\| < \|\Delta M\|$ ΔM = quantité minimum minéralisée ΔT = lessivage minimum.
	$\Delta T = 0$.	$\Delta m < 0$	impossible
		$\Delta m = 0$	impossible
		$\Delta m > 0$	pas de lessivage. La quantité ΔM minéralisée se retrouve dans le sol sous forme Δm.
	$\Delta T > 0$	$\Delta m < 0$	impossible
		$\Delta m = 0$	impossible
		$\Delta m > 0$	$\|\Delta m\| > \|\Delta M\|$ Δm = augmentation effective de la teneur du sol en azote minéral. ΔT = quantité d'azote devenue minéralisable en même temps que la quantité Δm a été minéralisée (prého-minéralisation). *ou bien* ΔM = quantité d'azote minéralisé $\Delta m - \|\Delta M\|$ = quantité d'azote minéral provenant d'une source autre que la minéralisation en place (azote minéral ajouté, azote lessivé ou remonté).
$\Delta M = 0$	$\Delta T < 0$	$\|\Delta m\| = \|\Delta T\|$	= quantité d'azote minéral lessivé.
	$\Delta T = 0$	$\Delta m = 0$	Il ne se passe apparemment rien.
	$\Delta T > 0$	$\|\Delta m\| = \|\Delta T\|$	Δm = quantité d'azote minéral produit aux dépens du minéralisable. ΔT = quantité d'azote préminéralisé (égale à la précédente). *ou bien* Δm = azote minéral provenant d'une source autre que la minéralisation en place.
$\Delta M > 0$	$\Delta T < 0$	$\Delta m < 0$	Δm = N minéral sorti du niveau analysé. ΔM = quantité de N minéral devenue minéralisable (réorganisation). ΔT = lessivage minimum.
		$\Delta m = 0$	impossible
		$\Delta m > 0$	impossible
	$\Delta T = 0$	$\Delta m < 0$	$\|\Delta m\| = \|\Delta M\|$ la quantité Δm d'azote minéral est transformée en azote minéralisable (réorganisation).
		$\Delta m = 0$	impossible
		$\Delta m > 0$	impossible
	$\Delta T > 0$	$\Delta m < 0$	$\|\Delta m\| < \|\Delta M\|$ Δm = azote minéral transformé en minéralisable (réorganisation). ΔT = azote organique devenu minéralisable (préminéralisation).
		$\Delta m = 0$	$\|\Delta M\| = \|\Delta T\|$ = quantité d'azote organique devenu minéralisable (préminéralisation).
		$\Delta m > 0$	Δm = quantité d'azote minéralisée avec ΔT = quantité totale d'azote organique devenue minéralisable (préminéralisation). *ou bien* Δm = quantité d'azote minéral provenant d'une autre source.

ou bien

il y a une minéralisation compensée par une préminéralisation de même valeur ;

si $M_2 > M_1$ préminéralisation (évolution de la matière organique vers des formes pouvant fournir à l'étuve de l'azote minéral) ;

réorganisation (évolution de l'azote minéral vers des formes organiques).

La juxtaposition de ces tableaux permet d'éliminer des incompatibilités. Les variations de l'azote minéral total obtenu après le séjour à l'étuve permettent d'obtenir le tableau final (tableau I) dans lequel nous exprimerons les variations sous les signes conventionnels Δm, ΔM, ΔT. Le point de départ en est la variation ($\Delta M = M_2 - M_1$) de la teneur en azote minéralisable.

Il reste encore quelques cas où on pourrait hésiter entre deux interprétations. Cette indétermination est en fait factice car la confrontation avec les données météorologiques élimine, dans la plupart des cas, une des possibilités.

Il est à remarquer, dans ce tableau clef, que les productions d'azote minéral ne sont pas forcément déterminées par les variations des teneurs des échantillons en azote minéral. De même la production d'azote minéralisable n'est pas uniquement indiquée par les variations des teneurs en azote minéralisable.

Ces observations permettent de réaliser un bilan minimum des données suivantes :

a) azote minéral lessivé ou sorti du niveau où a été pris l'échantillon,

b) azote minéralisé,

c) azote devenu minéralisable, c'est-à-dire évolution des réserves d'azote total.

Deuxième partie

RÉSULTATS

Dans cette deuxième partie, nous illustrerons les résultats théoriques donnés par le tableau d'interprétation des variations d'azote minéral et minéralisable que nous venons de présenter. Pour cela nous prendrons comme exemple les chiffres obtenus dans les parcelles témoins (sans fumure organique, ni minérale) d'un champ d'essai destiné, par ses autres parcelles, à fournir des éléments permettant de voir l'influence de traitements organiques et minéraux. De cet essai, commencé en 1955, nous utiliserons les chiffres obtenus au cours de l'année 1956. Les parcelles témoins sont au nombre de 4 et les chiffres indiqués dans le tableau II représentent la moyenne de ces quatre parcelles. Sachant par avance

que sous le climat de la Somme les variations apparentes des teneurs en azote minéral étaient faibles, il a paru utile de différencier la couche arable (0-30) en trois niveaux (0-10-10-20-20-30). Les prélèvements mensuels de ce seul témoin représentent donc 12 échantillons, et après passage à l'étuve 24 dosages d'azote minéral.

La couche 0-30 avait au départ la composition suivante :

p. 1000 de terre séchée à l'air

Cailloux	120

p. 1000 de terre fine

Argile	290
Limon	140
Sable fin	496
Sable grossier	27
Matières organiques	42,5
Calcaire	7
Azote	1,90
Acide phosphorique (oxalate)	0,20
Potasse échangeable	0,27
pH	7,27

Au 1er janvier 1956 la moyenne pour les 4 parcelles de la teneur en N total était pour les 3 horizons :

0 — 10	1,89
10 — 20	1,93
20 — 30	1,90

Moyenne générale : 1,90

Le tableau II donne les teneurs en azote minéral avant étuve(m), après étuve (T), et minéralisable (M), des différents horizons, suivant la date de prélèvement. Ces teneurs sont exprimées en mg d'azote minéral pour 100 g de sol sec (10 ppm). Comme elles s'appliquent à des couches de 10 cm de sol nous évaluerons, pour simplifier, à 1 000 tonnes le poids de terre de ces couches et dans ces conditions 1 mg/100 g équivaut à 10 kg/ha.

Partant de ce tableau nous avons calculé et reproduit dans le tableau III les différences mensuelles des trois valeurs analysées (m. T. M.).

La figure 1 groupe les données climatiques simples de l'année ; d'une part les températures minima et maxima diurnes en °C et d'autre part les chutes de pluies en mm.

Ces éléments réunis, nous pouvons utiliser les renseignements fournis par le tableau I. Par exemple :

Entre le 12 mars et le 12 janvier :

Pour le niveau 0-10 nous avons :

$$\Delta m = -0{,}2 \qquad \Delta T = -0{,}1 \qquad \Delta M = +0{,}1.$$

L'interprétation d'après le tableau est :

Δm = quantité de N minéral sorti du niveau analysé + 0,2.

ΔM = quantité de N minéral devenu minéralisable (réorganisation) 0,1.

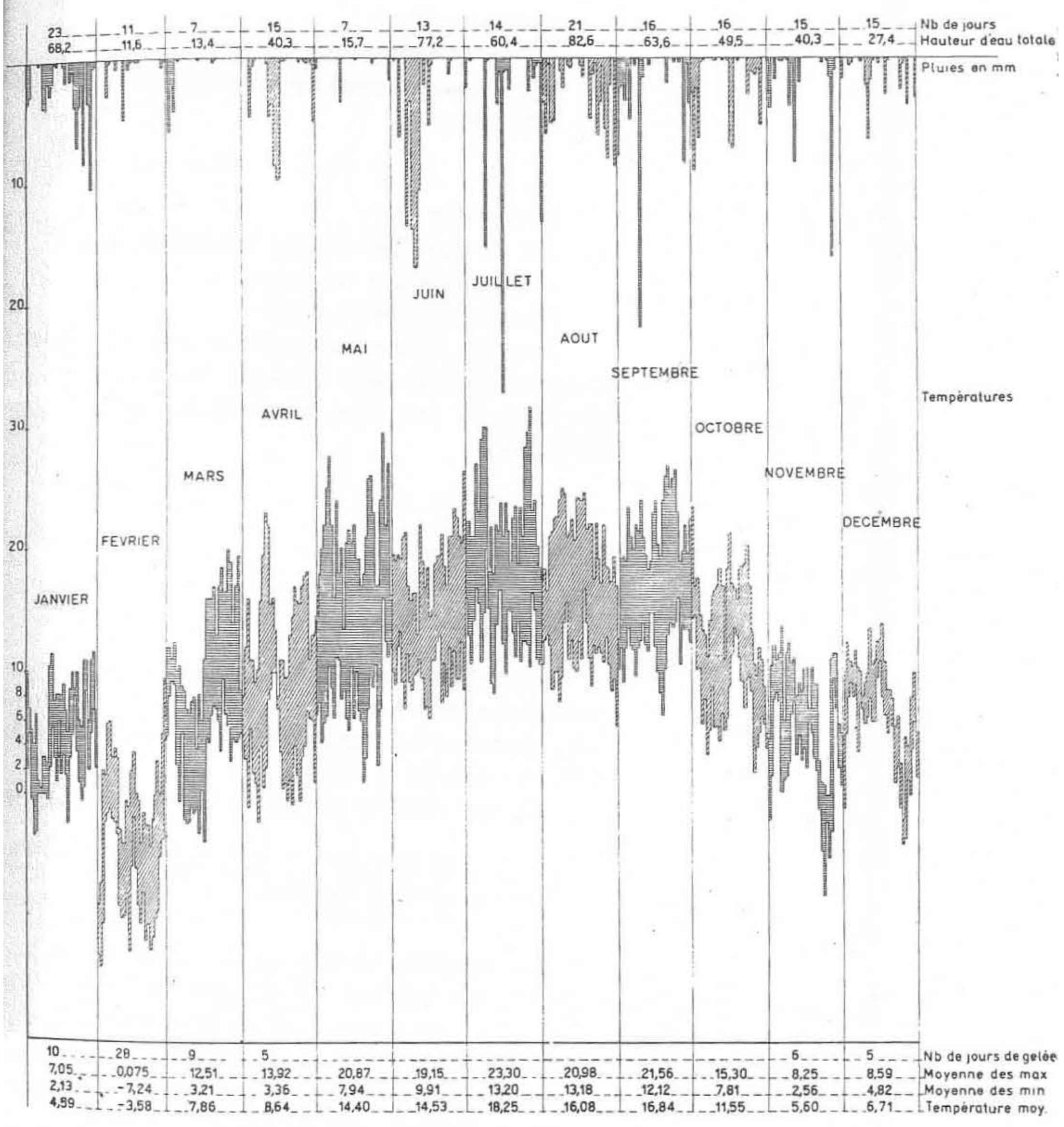
ΔT = quantité de N lessivé 0,1.

TABLEAU II. — *Teneurs en Azote minéral avant étuve* m, *après étuve* T, *et minéralisable* M, *d'échantillons de sols de parcelles témoins suivant la date de prélèvement — en mg/100 g de sol sec.*

Date de prélèvement	12,1	12,3	9,4	11,5	11,6	10,7	9,8	13,9	12,10	14,11	10,12	15,1
0 — 10 m	2,2	2,0	3,2	4,9	4,1	4,9	3,4	3,8	1,2	2,8	-0,3	0,8
T	5,6	5,5	6,0	9,8	10,1	8,0	4,4	4,7	4,4	9,2	3,9	3,4
M	3,4	3,5	2,8	4,9	6,0	3,1	1,0	0,9	3,2	6,4	4,2	2,6
10 — 20 m	3,1	2,3	4,2	4,9	4,2	5,5	4,0	2,5	2,6	3,3	3,0	2,4
T	7,1	4,2	5,0	7,2	7,2	6,8	6,8	5,7	6.9	5,8	3,7	5,8
M	4,0	1,9	0,8	2,3	3,0	1,3	2,8	3,2	4,3	2,5	0,7	3,4
20 — 30 m	3,2	3,4	1,6	3,8	3,7	4,1	5,8	5,1	4,9	3,8	3,5	2,9
T	8,6	7,6	6,0	6,5	7,4	8,3	7,7	4,1	4,7	5,8	6,4	4,2
M	5,4	4,2	4,4	2,7	3,7	4,2	1,9	−1,0	−0,2	2,0	2,9	1,3
0 — 30 m	8,5	7,7	9,0	13,6	12,0	14,5	13,2	11,4	8,7	9,9	6,2	6,1
T	21,3	17,3	17,0	23,5	24,7	23,1	18,9	14,5	16,0	20,8	14,0	13,4
M	12,8	9,6	8,0	9,9	12,7	8,6	5,7	3,1	7,3	10,9	7,8	7,3

TABLEAU III. — *Différences mensuelles observées entre les teneurs en azote minéral avant étuve* (Δm), *après étuve* (ΔT) *et minéralisable* (ΔM) *en mg/100 g de sol sec.*

	3 — 1	4 — 3	5 — 4	6 — 5	7 — 6	8 — 7	9 — 8	10 — 9	11 — 10	12 — 11	1 — 12
0 — 10 Δm	−0,2	1,2	1,7	−0,8	0,8	−1,5	0,4	−2,6	1,6	−3,1	1,1
ΔT	−0,1	0,5	3,8	0,3	−2,1	−3,6	0,3	−0,3	4,8	−5,3	−0,5
ΔM	0,1	−0,7	2,1	1,1	−2,9	−2,1	−0,1	2,3	3,2	−2,2	−1,6
10 — 20 Δm	−0,8	1,9	0,7	−0,7	1,3	−1,5	−1,5	0,1	0,7	−0,3	−0,6
ΔT	−2,9	0,8	2,2	0,0	−0,4	0,0	−1,1	1,2	−1,1	−2,1	2,1
ΔM	−2,1	−1,1	1,5	0,7	−1,7	1,5	0,4	1,1	−1,8	−1,8	2,7
20 — 30 Δm	0,2	−1,8	2,2	−0,1	0,4	1,7	−0,7	−0,2	−1,1	−0,3	−0,6
ΔT	−1,0	−1,6	0,5	0,9	0,9	−0,6	−3,6	0,6	1,1	0,6	−2,2
ΔM	−1,2	0,2	−1,7	1,0	0,5	−2,3	−2,9	0,8	2,2	0,9	−1,6
0 — 30 Δm	−0,8	1,3	4,6	−1,6	2,5	−1,3	−1,8	−2,7	1,2	−3,7	−0,1
ΔT	−4,0	−0,3	6,5	1,2	−1,6	−4,2	−4,4	1,5	4,8	−6,8	−0,6
ΔM	−3,2	−1,6	1,9	2,8	−4,1	−2,9	−2,6	4,2	3,6	−3,1	−0,5



GRAPHIQUE I. — Pluies et températures 1956.

Pour 10-20 les données sont :

$$\Delta m = -0{,}8 \qquad \Delta T = -2{,}9 \qquad \Delta M = -2{,}1.$$

Interprétation :

ΔM = quantité d'azote minéralisé, 2,1.

ΔT = quantité minimum d'azote minéral sorti du niveau analysé, 2,9.

Pour 20-30.

$$\Delta m = +0{,}2 \qquad \Delta T = -1 \qquad \Delta M = -1{,}2.$$

Interprétation :

ΔM = quantité d'azote minéralisé, 1.2.

ΔT = lessivage minimum, 1.

Pour l'ensemble du profil :

Tous les ΔT étant négatifs on peut en conclure que les pluies, relativement faibles, mais tombant sur un sol précédemment saturé, ont effectivement provoqué un lessivage. Pour la couche 0-30 on obtient finalement

	Azote minéral lessivé.	Azote minéralisé.	Azote minéral réorganisé.
	—	—	—
0 — 10	0,2	0	0,1
10 — 20	2,9	2,1	—
20 — 30	1,0	1,2	—
	—	—	—
00 — 30	4,1	3,3	0,1

Les écarts observés le mois suivant sont intéressants car ils donnent précisément lieu à une interaction entre les niveaux de prélèvements. Cette interaction est à rechercher quand la somme des variations n'est pas égale à la variation de la somme.

Si l'on considère séparément les échantillons on trouve :

0 — 10	Azote minéralisé..1,2	Azote organique devenu minéralisable (préminéralisé)..0,5
10 — 20	Azote minéralisé..1,9	Azote organique devenu minéralisable (préminéralisé)..0,8
20 — 30	Azote sorti de l'échantillon..1,8	
	Azote réorganisé 0,2	

Les conditions climatiques indiquent : pluie, 5 mm, quantité insuffisante pour entraîner un lessivage des couches profondes de 1,8 mg d'N. Il faisait au contraire sec et une partie de l'azote a pu migrer vers le haut. En reprenant les chiffres, on ne doit alors attribuer (suivant la deuxième possibilité décrite dans le tableau I), aux niveaux supérieurs comme azote minéralisé, que la quantité d'azote minéralisable effectivement perdue. Le reste de l'augmentation d'azote minéral est fourni par de l'azote remonté du niveau inférieur.

soit :

0-10	Azote minéralisé....	0,7	Azote en provenance d'une autre couche....	0,5
10-20	» »	1,1	-id-	0,8
20-30	» lessivé.....	0,3	Azote réorganisé	0,2

Le mois suivant n'offre aucune difficulté. La température monte, les pluies sont faibles. Il y a préminéralisation et minéralisation pour tous les niveaux :

0–10	Azote minéralisé	1,7	Azote préminéralisé	3,8
10–20	» »	0,7	» »	2,2
20–30	» »	2,2	» »	0,5
		4,6		6,5

Et ainsi de suite.

Les résultats pour l'ensemble de l'année sont groupés dans le tableau IV.

TABLEAU IV

Dynamique de l'Azote minéral et minéralisable au cours de l'année 1956 dans un niveau de sol 0,30.

Mois	Niveau	Azote lessivé ou sorti du niveau analysé	Azote minéralsé	Azote en provenancc d'un autre niveau	Azote minéral réorganisé au cours du lessivage	Azote organique devenu minéralisable (préminéralisé)
3,–1	0 — 10....	0,2	—	—	0,1	—
	10 — 20..	2,9	2,1	—	—	—
	20 — 30	1,0	1,2	—	—	—
4,–3	0 — 10....	—	0,7	0,5	—	—
	10 — 20..	—	1,1	0,8	—	—
	20 — 30	1,8	—	—	0,2	—
5,–4	0 — 10....	—	1,7	—	—	3,8
	10 — 20..	—	0,7	—	—	2,2
	20 — 30	—	2,2	—	—	0,5
6,–5	0 — 10....	0,8	—	—	0,8	0,3
	10 — 20..	0,7	—	—	0,7	—
	20 — 30	0,1	—	—	0,1	0,9
7,–6	0 — 10....	2,1	2,9	—	—	—
	10 — 20..	0,4	1,7	—	—	—
	20 — 30	—	—	0,4	0,5	—
8,–7	0 — 10....	3,6	2,1	—	—	—
	10 — 20..	1,5	—	—	1,5	—
	20 — 30	0,6	2,3	—	—	—
9,–8	0 — 10....	—	0,1	0,3	—	—
	10 — 20..	1,5	—	—	0,4	—
	20 — 30	3,6	2,9	—	—	—
10,–9	0 — 10....	2,6	—	—	2,3	—
	10 — 20..	—	—	0,1	—	1,1
	20 — 30	0,2	—	—	0,2	0,6
11,–10	0 — 10....	—	0,5	1,1	—	3,7
	10 — 20..	1,1	1,8	—	—	—
	20 — 30	1,1	—	—	1,1	1,1
12,–11	0 — 10....	5,3	2,2	—	—	—
	10 — 20..	2,1	1,8	—	—	—
	20 — 30	0,3	—	—	0,3	0,6
1,–12	0 — 10....	0,5	1,6	—	—	—
	10 — 20..	0,6	—	—	0,6	2,1
	20 — 30	2,2	1,6	—	—	—
Total annuel		15,1	11,8	1,9	3,2	7,8
		10,8	9,2	0,9	3,2	5,4
		10,9	10,2	0,4	2,4	3,7
Total 0 — 30		36,8	31,2	3,2	8,8	16,9

Tous les éléments chiffrés fournis par les tableaux des pages précédentes sont figurés dans les graphiques suivants pour en faciliter la lecture.

Le graphique n° II indique par son trait médian, plein, les variations au cours de l'année, de la teneur de l'horizon 0-30 en azote minéral. Ce trait est encadré par une courbe supérieure représentant la production cumulée, de mois en mois, de l'azote minéral pour l'ensemble du profil et par une courbe inférieure totalisant de la même façon les lessivages mensuels. Les trois séries de trois courbes en traits plus fins représentent les mêmes données pour les couches séparées 0-10, 10-20, 20-30.

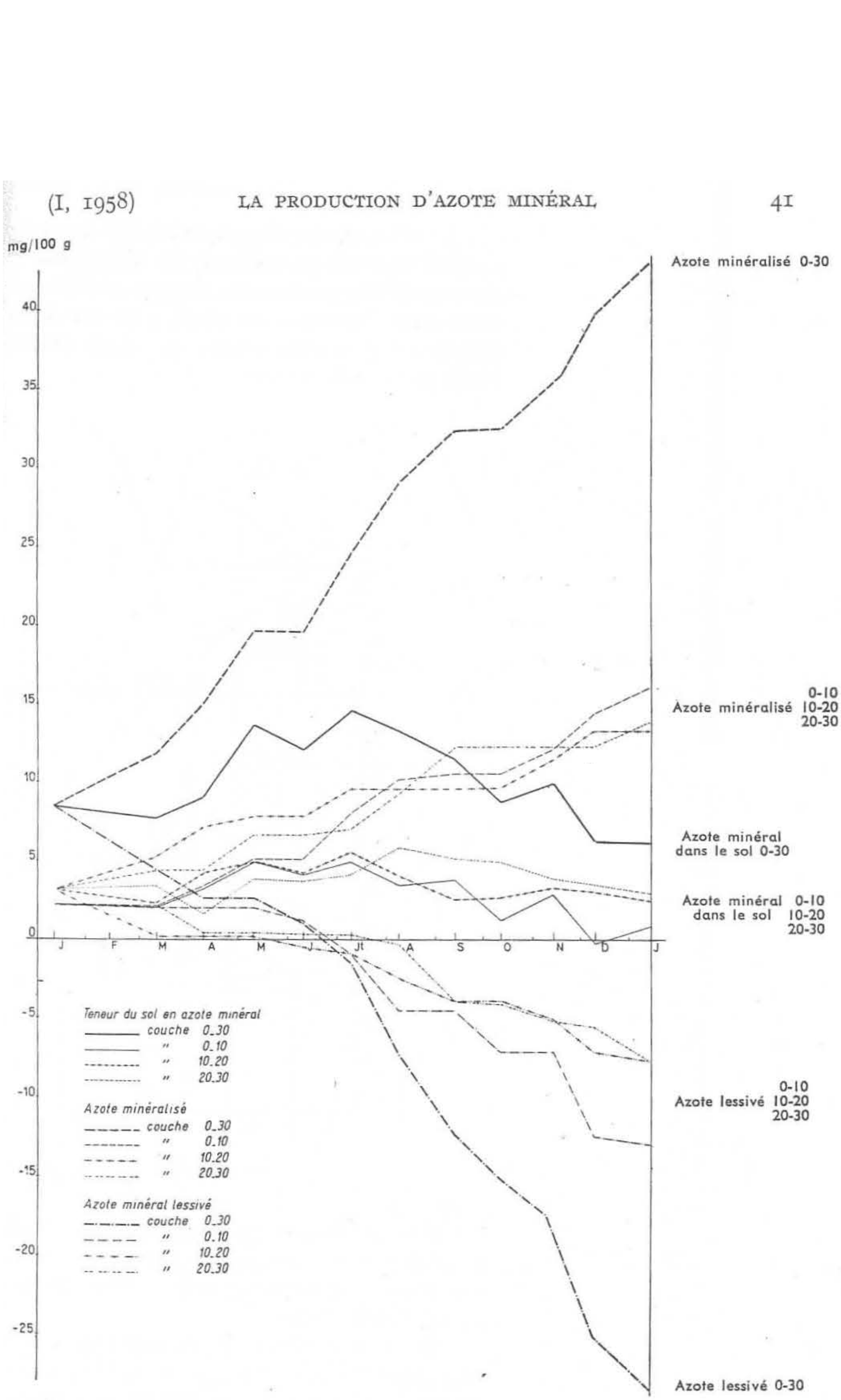
Le graphique n° 3 schématise pour chacun des niveaux et pour l'ensemble du profil, d'une part la production mensuelle d'azote minéral, avec en pointillé, la récupération d'azote des niveaux adjacents ou la migration de l'azote, précédemment formé, entre les niveaux, d'autre part l'azote minéral lessivé et en troisième lieu l'azote préminéralisé dans lequel figure, également en pointillé, l'azote minéral récupéré au cours des lessivages.

Cet ensemble de tableaux et de figures nous permet de faire ressortir les points suivants :

1. — Les variations, au cours des mois, de la teneur de l'ensemble du profil en azote minéral, ne sont pas considérables (trait plein médian du graphique II). Elles oscillent entre un minimum de 6,1 mg/100 g et un maximum de 14,5 mg/100 g. Différence absolue : 8,4 mg soit, suivant nos données, 84 kg/ha. Mais on voit par les courbes cumulées, supérieure et inférieure de ce graphique, qu'elles représentent pour chaque mois un bilan qui annuellement correspond en 1956 à un gain (production d'azote minéral) de 31,2 mg/100 g (312 kg/ha) et à des pertes de 36,8 mg/100 g (368 kg/ha).

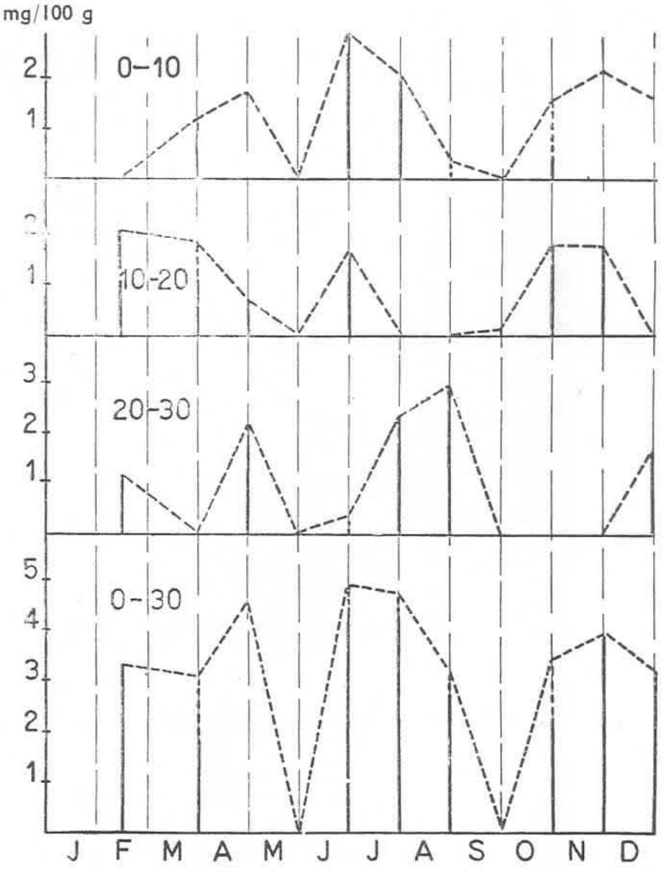
Le bilan s'établit bien ainsi :	mg/100g. +	mg/100g. —
teneur en azote minéral du sol au 12 Janvier 1956 ..	8,5	
azote minéralisé au cours de l'année	31,2	
azote lessivé — azote échangé entre les couches 36,8 — 3,2 = 33,6		33,6
teneur en azote minéral du sol au 15 Janvier 1957 ..	6,1	

2. — La courbe d'azote minéral montre, pour l'année considérée, deux maxima, l'un en avril-mai, l'autre en juin-juillet. Les productions mensuelles d'azote minéral (courbes centrales 0-30 du graphique III) présentent elles aussi des maxima à ces mêmes époques mais elles indiquent également que le maximum d'accumulation aurait dû exister en septembre si les mois d'août et de septembre n'avaient pas correspondu à des lessivages importants. Ceci confirme que la mesure d'azote minéral, seule, en période permettant un entraînement en profondeur, ne donne pas d'indications sur la quantité d'azote minéral mise à la disposition des plantes.



GRAPHIQUE II. — Variation de la teneur du sol en azote minéral. en tant que bilan de sa production et de ses pertes cumulées.

3. — La courbe du graphique III de production mensuelle d'azote minéral mettrait en évidence un phénomène très important que nous devrons vérifier par la suite. Dans la période analysée, elle indique nettement pour l'ensemble du profil 0-30 une production cyclique, dont la période est, pour cette courbe, de 3 mois. Cette impression peut être renforcée par le fait suivant :



GRAPHIQUE III. — Azote minéral formé.

Si on prolonge la courbe, à ses deux extrémités, par des chiffres ne figurant pas dans le mémoire, on trouve entre décembre et janvier 1955 une production faible 0,3 mg et entre janvier et février 1957 une autre production faible 0,9.

Cette production cyclique correspondrait facilement à un phénomène biologique. Mais il est frappant, en l'occurrence de noter que ce cycle — invisible sur les courbes de teneurs mensuelles — paraît presque indépendant des conditions climatiques.

Pour Mars-Avril-Mai on relève une production globale de..	3,3 + 1,8 + 4,6 = 9,7 mg/100g.
Juillet-Août-Septembre..................................	4,6 + 4,4 + 3,0 = 12,0
Octobre-Novembre-Décembre...........................	2,3 + 4,0 + 3,2 = 9,5

La quantité totale produite au cours de la période chaude est un peu plus importante mais elle reste voisine de 100 kg/ha comme celles produites en début ou en fin de saison.

La période de non production est précédée ou suivie d'une période de préminéralisation.

Ces faits, s'ils se vérifient, au cours des années, représenteraient un point capital dont la manifestation pourrait être caractéristique du climat du nord de la France.

4. — La production d'azote minéral, pour l'ensemble de l'année, varie assez peu avec le niveau de la couche prélevée. En reprenant les chiffres figurant au bas du tableau IV on trouve en effet :

0–10	Azote minéralisé	11,8 mg/100 g.	soit 118 kgs/hectare
10–20	Azote minéralisé	9,2 mg/100 g.	soit 92 kgs/hectare
20–30	Azote minéralisé	10,2 mg/100 g.	soit 102 kgs/hectare

Par contre la régénération des réserves d'azote minéralisable est nettement influencée et diminue avec la profondeur.

	Azote minéral réorganisé au cours du lessivage		Azote organique devenu minéralisable	
	—		—	
0–10	3,2	+	7,8	= 11,0
10–20	3,2	+	5,4	= 8,6
20–30	2,4	+	3,7	= 6,1

Les conditions d'efficacité des microorganismes réalisant ces deux phases de la minéralisation paraissent donc ne pas être les mêmes. Cette observation montre que le labour, en dehors d'autres caractères de son action, en mélangeant les différentes couches du sol, permet une meilleure utilisation des réserves azotées superficielles, tout en permettant au cours de l'année, un certain stockage des réserves profondes.

5. — Reconsidérant le bilan présenté plus haut, on peut être frappé de la valeur des chiffres. Suivant les données classiques il semble anormal qu'un sol dosant en moyenne 1,9 p. 1 000 d'azote pour la couche 0-30 minéralise au cours de l'année 312 kg d'azote (soit 312/5 700 = 5,47 p.100).

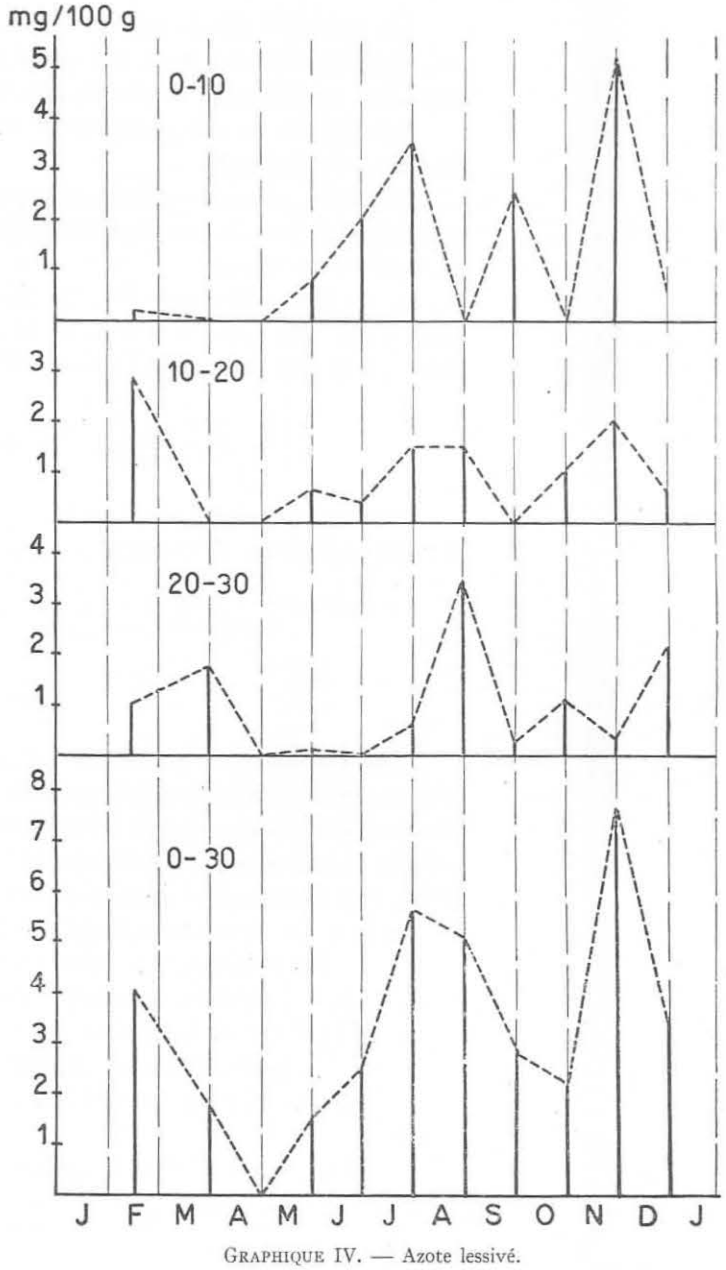
Pour faire accepter ces chiffres on peut présenter les remarques suivantes :

a) Les pertes d'azote minéral subies par le sol sont inférieures à la production ; elles s'établissent en effet de la façon suivante :

	+	—
Azote sorti des différents niveaux...........	36,8	
Azote retrouvé dans un autre niveau		3,2
Azote réorganisé en cours du lessivage		8,8
		12,0
	24,8	

Ces pertes représentent donc 248/5 700 = 4,35 p. 100.

Ceci permet de chiffrer un caractère très important de l'économie



GRAPHIQUE IV. — Azote lessivé.

de l'azote dans le sol. La différence dans le cas considéré entre la production — c'est-à-dire la quantité d'azote mise à la disposition des cultures —

et la quantité d'azote perdu pour le sol (même en l'absence de culture), est de 312 — 248 = 64 kg/ha.

b) L'évolution des réserves azotées, c'est-à-dire la quantité d'azote organique devenu minéralisable, au cours de l'année, ne s'élève qu'à 169 kg, c'est-à-dire (169/5 700 = 2,97 p. 100 des réserves).

Le bilan de l'azote minéralisable s'établit en effet ainsi :

	mg/100 g. +	mg/100 g. —
Teneur en azote minéralisable du sol au 12-1-1956	12,8	
Azote organique devenu minéralisable...............	16,9	
Azote minéral réorganisé au cours des lessivages	8,8	
	38,5	
Azote minéralisé.................................		31,2
Teneur du sol en azote minéralisable au 15-1-1956	7,3	

La dynamique totale de l'azote peut se résumer comme suit : pour une production effective d'azote minéral de :

312 kg soit 5,47 p. 100 des réserves organiques.

Les pertes s'élèvent à :

248 kg soit 4,35 p. 100 des réserves organiques.

Pendant que l'usure des réserves organiques est de :

169 kg soit 2,97 p. 100 des réserves organiques,

et que l'azote minéral réorganisé ramène au niveau des pertes l'évolution de l'azote minéralisable : 169 + 88 = 257 kg.

En ce qui concerne la consommation du stock organique, il faut donc prendre comme valeur le chiffre d'azote organique devenu minéralisable, soit 169 kg/ha (2,97 p. 100).

c) On peut être amené à convertir cette consommation d'azote en consommation de matières organiques. Partant d'un rapport Matières organiques sur Azote de 20 on obtient une destruction annuelle de $169 \times 20 \# 3\,400$ kg de matières organiques.

Ces chiffres ne sont cependant pas en contradiction formelle avec les observations pratiques. Si l'on considère par exemple une rotation Betteraves, Blé, Pommes de terre, Blé, recevant une fumure au fumier de ferme de 40 tonnes à l'hectare on peut suivant les chiffres présentés par KOHNLEIN et VETTER, pour évaluer les résidus de récoltes, établir la balance suivante :

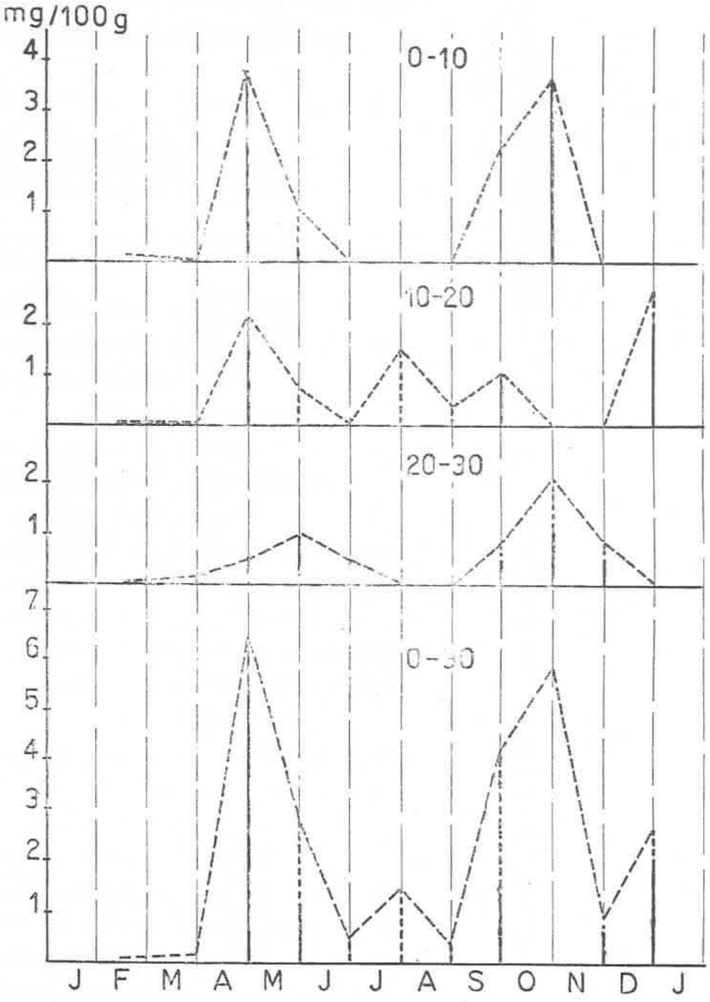
Fumier 40 tonnes à 25 % de M.S............	10 T.
Betteraves : résidus radiculaires	0,6
Blé : racines et chaumes......................	1,2
Pommes de terre............................	0,3
Blé	1,2
Soit un apport total de......................	13,3 T.

pour une consommation minimum (nos chiffres s'appliquant à des parcelles sans fumier) de $3\,400 \times 4 = 13{,}6$ t.

Ceci concorde avec le fait qu'un bon entretien correspond à un fumier

tous les 4 ans en l'absence de tout autre apport externe de matières organiques.

Nous n'insisterons pas ici sur cet aspect de la question qui sera repris ultérieurement.



GRAPHIQUE V. — Azote préminéralisé.

6. — Les résultats présentés sur la minéralisation de l'azote en place, permettent déjà d'envisager, bien qu'encore d'une façon vague, le comportement des cultures.

En prenant les chiffres de l'année que nous avons analysée, on peut, par exemple, chercher à calculer la quantité d'azote minéral mise à la disposition d'une culture de betteraves.

Nous estimerons que la betterave bénéficie, soit directement, soit

par suite des entraînements, de tout l'azote minéralisé dans la couche 0-10 depuis la période avril-mai jusqu'en octobre. Nous prendrons également l'azote minéralisé dans la couche 10-20 de la période mai-juin à octobre et enfin celui de la couche 20-30 de juin-juillet à octobre.

La quantité d'azote minéral mise ainsi par les réserves du sol à la disposition d'une culture de betterave sera suivant les chiffres du tableau IV:

Couche 0–10	Avril-Octobre	7,1 mg/100 g.
Couche 10–20	Mai-Octobre	1,7 mg/100 g.
Couche 20–30	Juin-Octobre...........	5,6 mg/100 g.
		14,4 = 144 kgs/ha

Dans une autre expérience faite, cette même année 1956, sur betteraves, les parcelles témoins, sans apport extérieur d'azote minéral mais bénéficiant d'un enfouissement de culture dérobée de Trèfle Ladino, ont exporté pour une production de 54 tonnes de betteraves et 39 tonnes de Verts, 97 kg d'Azote dans les feuilles et 70 kg d'Azote dans les racines, soit au total 167 kg/ha.

Ces deux chiffres ne sont pas discordants.

Toutes ces constatations, fournies par l'interprétation des variations simultanées de l'azote minéralisable, semblent devoir nous permettre de préciser certains aspects de la libération et de l'utilisation de l'azote minéral. Montrant en particulier la différence existant entre la quantité d'azote minéral produite au cours d'une année et la quantité de ce même azote effectivement perdue pour les réserves du sol, elles expliquent l'écart relevé entre les quantités d'azote, prélevées par des cultures en l'absence d'apports minéraux extérieurs et les pertes intervenant dans un bilan général de matières organiques. Nous analyserons prochainement l'influence d'apports organiques sur ces différentes grandeurs.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Après quelques considérations générales destinées à indiquer la place et le rôle des mesures de l'azote minéral au champ, nous avons présenté une méthode permettant d'interpréter les résultats fournis par ces données complétées par des essais de minéralisation à l'étuve.

Dans la seconde partie du mémoire une application de cette méthode a été présentée en utilisant les observations relevées sur une couche de 30 cm de sol analysée de 10 cm en 10 cm. Les résultats ainsi recueillis ont permis un certain nombre de conclusions qui, bien que pouvant heurter certaines données classiques, s'accordent avec les résultats pratiques. Elles devront être encore soumises à des contrôles prolongés. Les principales sont les suivantes :

a) Possibilité d'une production cyclique de l'azote minéral sous le climat du nord de la France.

b) Minéralisation portant sur un pourcentage de l'azote total nettement plus élevé que celui admis généralement et présentant un net décalage avec la destruction effective du stock de matières organiques.

Ces observations permettront vraisemblablement une meilleure interprétation des essais azotés de plein champ. L'influence de traitements organiques sera analysée dans un mémoire ultérieur.

RÉSUMÉ

Essai de bilan de la production d'azote minéral d'un sol en place

Après quelques considérations générales destinées à indiquer la place et le rôle des mesures de l'azote minéral au champ les auteurs présentent une méthode permettant d'interpréter les résultats fournis par ces données, complétées par des essais de minéralisation à l'étuve.

Les auteurs exposent ensuite une application de cette méthode en utilisant les observations relevées sur une couche de 30 cm de sol analysée de 10 cm en 10 cm.

Les principales conclusions tirées de ce travail sont :

a) Possibilité d'une production cyclique de l'azote minéral sous le climat du nord de la France.

b) Minéralisation portant sur un pourcentage de l'azote total nettement plus élevé que celui admis généralement et présentant un net décalage avec la destruction effective du stock de matières organiques.

Ces observations permettront vraisemblablement une meilleure interprétation des essais azotés en plein champ.

SUMMARY

An experiment on the balance of mineral-nitrogen production in a field soil

The importance and role of measurements of mineral nitrogen in the field are discussed and a method for the interpretation of such results, complemented by incubation tests on mineralization, is presented. The application of the method is shown by observations made on a 30-cm layer of soil analysed at every 10-cm depth.

Results indicated :

a) a possible cyclical production of mineral nitrogen under climatic conditions in northern France ;

b) a much greater per cent mineralization of total nitrogen than generally assumed, showing a marked lag as the reserves of organic matter are being effectively destroyed.

The observations are likely to lead to a better interpretation of nitrogen experiments in the field.

ZUSAMMENFASSUNG

Bilanzversuch der Mineralstickstoffproduktion eines Bodens auf dem Felde

Nach einigen allgemeinen Betrachtungen über die Lage und den Zweck der Bestimmung des Mineralstickstoffes auf dem Felde, wird von den Autoren eine Methode vorgechlagen die erlaubt die, durch diese Mineralisierungsmessungen gewonnene Ergebnisse zu erläutern, Messungen die durch Mineralisierungsversuche im Trockenschrank ergänzt werden.

Die Autoren erklären dann eine Anwendung dieser Methode mit Hilfe der auf einer 30 cm dicken Bodenschicht gemachten Beobachtungen, Bodenschicht die jede 10 cm analysiert wurde.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen, die aus dieser Arbeit gewonnen wurden, sind folgende :

a) Möglichkeit einer zyklischen Mineralstickstoffproduktion unter dem Klima von Nordfrankreich.

b) Mineralisierung eines Prozentsatzes des Gesamtstickstoffs der wesentlich grösser ist als der gewöhnlich anerkannte. Deutliche zeitliche Verschiebung der Mineralisierung mit dem reellen Abbau der organischen Masse.

Eine bessere Erklärung der Stickstoffdüngungsversuche auf dem Felde wird wahrscheinlich durch diese Beobachtungen gegeben werden.

РЕЗЮМЕ

Попытка установить билан выработки минерального азота почвы поля.

Ж. ЛЕФЭВР и Ж. ХИРУ.

После изложения некоторых общих соображений имеющих целью указать место и роль определений минерального азота в поле, авторы представляют метод позволяющий оценивать результаты этих данных, дополненных определением минерализации в сушильном шкафу.

Затем, авторы излагают приложение этого метода, пользуясь наблюдениями, сделанными на слое почвы в 30 см, изученном в отдельности для каждых 10 см.

Главные заключения этой работы таковы :

а. Возможность закономерного (циклического) производства минерального азота в условиях климата Севера Франции.

б. Минерализация затрагивает процент от общаго азота значительно больший, чем это обычно принято, и представляет ясное несогласование с действительным уменьшением запаса органического вещества.

Эти наблюдения позволят, возможно, лучше понимать опыты с азотом в полевых условиях.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) Collier (D.). — Evolution de l'azote minéral et minéralisable en sol nu de terre noire de Limagne. *Travaux des Stations agronomiques*, p. 35, 1956.

(2) Dhar. — *Proc. National Acad. Sci. of India*, **19**, 201, 1950.

(3) DROUINEAU (G.), LEFÈVRE (G.), Mme BLANC-AICARD. — Estimation de la richesse des sols en azote et aspects particuliers de ce problème dans la région méditerranéenne. *Inter. Soc. of Soil Sc. Dublin Transaction.*, vol. 1, p. 13-21.
(4) DROUINEAU (G.), LEFÈVRE (G.), Mme BLANC-AICARD. — Observations sur la localisation de l'azote minéral en été sous le climat méditerranéen. *Ann. Agr.*, p. 245-256, 1953.
(5) DROUINEAU (G.), GOUNY (P.), LEFÈVRE (G.). — Sur la nitrification dans les sols calcaires. *C. R. Ac. Sc.*, p. 957-8, 1948.
(6) HALLAIRE (M.). — Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. *Annales Agronomiques*, p. 143-243, 1953.
(7) HARMSEN (G. W.) et VAN SCHREVEN (D. A.). — Minéralization of organic Nitrogen in soil. *Advances in Agronomy*, vol. VII, p. 299-398, 1955.
(8) JOLIVET (E.). — Étude sur la minéralisation de l'azote organique en Bretagne. Travaux des Stations agronomiques. *Annales Agronomiques*, p. 720, 1955.
(9) KÖHNLEIN (J.) et VETTER (H.). — « Ernterückstande und Wurzelbild », 138 pp. Paul Farcy. Hamburg, Berlin.
(10) MACINTIRE (W. H.), YOUNG (J. B.), SHAW (W. M.), et ROBINSON (B.). — Nitrogen Recoveries from Applications of Ammonium Chloride, Phosphate, and Sulfate and Outgo of Complementary Ions in Rainwater Leachings through a Six-foot Soil -subsoil Columm. *Soil. Sci. Society of America Proc.*, vol. 16, p. 301-6, 1952.
(11) SIMONART (P.), et BUYSSE (R.). — Bactéries et Acides aminés libres dans le sol. Ve Congrès International de la Science du sol. Léopoldville, p. 136-9, 1954.
(12) VAN DEN HENDE (A.) et MATON (A.). — Considérations relatives à l'économie de l'azote dans les sols belges. VIe Congrès International de la Science du sol, vol. B, p. 499-504.

Mémoire remis le 10 octobre 1957.